

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FILOZOFSKI FAKULTET  
ODSJEK ZA ARHEOLOGIJU

Miroslav Vuković

**Upotreba bespilotnih letjelica u arheologiji**

Diplomski rad

mentor: dr.sc. Ina Miloglav

Zagreb, 30. siječnja 2015.

Najtoplije se zahvaljujem svojoj mentorici dr. sc. Ini Miloglav na brojnim stručnim savjetima, strpljenju i potpori tijekom izrade ovoga rada. Nadalje bih se zahvalio dr. sc. Mirjani Sanader red. prof., dr. sc. Hrvoju Potrebici izv. prof., dr. sc. Domagoju Perkiću, višem kustosu Robertu Čiminu, višoj kustosici Marini Šimek, višoj kustosici Dori Kušan te višem konzervatoru Igoru Miholjeku na ustupljenom fotografskom i dokumentacijskom materijalu. Na savjetima i suradnji na istraživanjima, te strpljenju za nove ideje i tehnologije bih se htio zahvaliti: dr. sc. Domagoju tončiniću, dr. sc. Morani Čaušević-Bully, dr. sc. Sebastienu Bullyu, dr. sc. Janji Mavrović Mokos, te djelatnicima Arheološkog muzeja u Zagrebu i Hrvatskog restauratorskog zavoda, s kojima sam surađivao u proteklih par godina na više istraživanja.

Zahvalio bih se i prof. Michaelu Doneusu sa Bečkog Ludwig-Boltzmann instituta i čitavom njegovom timu, te i Austrijskom OeAD-u koji mi je dodjelio stipendiju za odlazak u Beč. Konačno zahvaljujem se svojoj obitelji i svojoj budućoj supruzi na ljubavi i razumijevanju tijekom studiranja.

## Sadržaj:

1. Uvod .....	1
2. Popis kratica i pojmova .....	2
3. Kratki pregled razvoja bespilotnih letjelica.....	3
4. Pregled i klasifikacija bespilotnih letjelica .....	7
5. Primjena u arheologiji .....	9
5.1. Visoke zračne fotografije – zračna prospekcija .....	9
5.2. Niske zračne fotografije - dokumentacija .....	10
5.3. Snimanje za potrebe izrade fotogrametrijskog 3D modela .....	13
5.4. Fotografiranje bespilotnom letjelicom i plan leta .....	19
5.5. Prikupljanje podataka drugim metodama (termalne, infracrvene i video kamere; LiDAR ili laserski skener) .....	23
6. Studija slučaja.....	25
6.1. Primjeri iz prakse .....	27
6.1.1. Prezentacijske fotografije.....	27
6.1.2. Zračna prospekcija .....	29
6.1.3. Fotografiranje za potrebe izrade nacрта.....	33
6.1.4. Fotografiranje za potrebe izrade fotogrametrijskog 3D modela .....	36
7. Zaključak .....	38
8. Literatura .....	39
9. Popis slika.....	41

## 1. Uvod

Bespilotne letjelice su u upotrebi već dugi niz godina, no tek je nedavno postala dostupna tehnologija koja je dovoljno sofisticirana za precizna arheološka mjerenja i dokumentaciju. S obzirom da se radi o, uvjetno rečeno, novoj tehnologiji teško je bilo naći adekvatnu literaturu za ovu temu.

Odličan izvor informacija su mi pružili članci i radovi pronađeni na internetu, s posebnim naglaskom na one objavljene u sklopu Konferencije o bespilotnim letjelicama u geomatici, u Zurichu. Radovi su objavljeni u sklopu: „*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVIII, UAV, 2011.*“ Odličan izvor informacija je bio i doktorski rad pod naslovom „*UAV Photogrammetry*“ kojeg je napisao Dr. Henri Eisenbeiss 2009. godine i koji je predan na Federalnom institutu za tehnologiju u Zurichu. Izvori s polja zračne arheologije su mi bili prvenstveno D.R. Wilson i njegova knjiga *Air Photo Interpretation for Archaeologists*, Gloucestershire, 2000., te izvori i tekstovi objavljeni na stranicama grupe koja se bavi istraživanjima na polju zračne arheologije (*engl. AARG – Aerial Archaeology Research Group - <http://www.univie.ac.at/aarg/php/cms/>*). Važan izvor osnovnih informacija na temu zračne arheologije koji mi je pomogao koncipirati poglavlja koja se dotiču zračne arheologije bila je internet stranica bečkog sveučilišta i njihove zračne arhive koju vodi Dr. Michael Doneus (*<http://luftbildarchiv.univie.ac.at/aerial-archaeology>*).

Literatura i tekst ovoga rada prilagođeni su za arheološku struku, no neke tehničke pojmove iz drugih struka je bilo ipak nemoguće izbjeći u pisanju ovoga teksta. U tu svrhu je iznesen i popis kratica i pojmova koje su nužne za razumijevanje teksta. Bitno je bilo pojednostaviti određene stvari i ne ulaziti dublje u problematiku i tehničke specifikacije letjelica, kako bi fokus ostao na potencijalnoj primjeni u arheologiji, što i jest tema ovoga rada.

## 2. Popis kratica i pojmova

3D - trodimenzionalno

AARG –*engl. Aerial Archaeology Research Group; hrv. Istraživačka grupa zračne arheologije*

BAR – *engl. British Archaeological Reports*, časopis

CPU – *engl. Central Processing Unit*; Procesor

Dron – *engl. Drone*; naziv za bespilotnu letjelicu

Fotogrametrija – znanost koja se bavi uzimanjem mjera iz fotografija

Geomatika – disciplina unutar geodezije koja se bavi prikupljanjem, spremanjem, obradom i izradom geografskih i georeferenciranih podataka

GNSS – *engl. Global Navigation Satellite System*; Pojam koji objedinjava sve poznate satelitske navigacijske sustave (GPS, GLONASS, Galileo)

ISPRS – *eng. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

LAAP – *engl. Low Altitude Aerial Photograph*; Niska zračna fotografija

LiDAR – *engl. (Light Detection and Ranging)* laserski skener, 3D skener

NIR – *engl. Near Infra Red*; Blisko infracrveno područje

Ortofotografija – zračna fotografija koja je geometrijski ispravljena tako da odgovara mjerilu (može se smatrati ekvivalentom karte)

RAM – *engl. Random Access Memory*; Virtualna memorija

UAV – *engl. Unmanned Aerial Vehicle*

HRZ – Hrvatski restauratorski zavod

### 3. Kratki pregled razvoja bespilotnih letjelica

Kao i s većinom tehnologija, razvoj bespilotnih letjelica usko povezujemo s ratovanjem i vojskom, gdje je civilna upotreba u većini slučajeva uslijedila tek nakon vojne.

Prva bespilotna letjelica je poletjela 1883. godine, pod kontrolom Douglasa Archibalda. Zmaj koji je na sebi nosio instrumente za mjerenje brzine vjetra, a kojima je g. Archibald 1887. godine dodao još i kamere, postao je prva bespilotna letjelica za izviđanje. Tijekom španjolsko-američkog rata William Eddy je iskoristio ovaj izum kako bi izviđao neprijateljske pozicije, što je obilježilo i prvu primjenu bespilotne letjelice u borbi.<sup>1</sup>

Tijekom prvog svjetskog rata Charles Kettering je razvio „*Kettering Aerial Torpedo*“ ili Ketteringovu bubu, kako je popularno nazvana. Radilo se o malom avionu koji je unaprijed bio postavljen na određenu dužinu leta, prije nego što bi izbacio svoj tank s gorivom iznad mete i sam se obrušio na tlo.



Slika 1: „*Kettering Bug*“

[http://en.wikipedia.org/wiki/Kettering\\_Bug](http://en.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug)

Možda i najvažniji element u razvoju bespilotnih letjelica je bio razvoj podatkovnih veza. Profesor Archibald Low, rođen u Engleskoj 1888. godine je poznat i kao „Otac radijskih sustava za navođenje“. On je razvio prvu podatkovnu vezu, i uspješno otklonio smetnje

---

<sup>1</sup>Fahlstrom & Gleason, Introduction to UAV systems, West Sussex, 2012.

uzrokovane radom motora letjelice. Godine 1924. on uspješno izvodi prvi radijski kontrolirani let.<sup>2</sup>

Između dva svjetska rata tvrtka „Radioplane“ razvija veći broj letjelica za potrebe vojske, u svrhu vježbanja gađanja pokretne mete na nebu. Tijekom 60-ih i 70-ih godina bespilotne letjelice se sve više počinju koristiti i u svrhu izviđanja, a u Izraelu ih koriste i za precizno uništavanje strateških meta tokom sukoba sa Sirijom. Tijekom američke operacije „Desert Storm“ u Iraku 1991., prepoznat je potencijal bespilotnih letjelica, te je intenziviran njihov razvoj. Njihov vojni angažman je bitno spomenuti i u Bosni tijekom bombardiranja NATO-a, te u američkim ratovima u Afganistanu i Iraku.

Civilne bespilotne letjelice su se razvijale paralelno s onim vojnim i to vrlo često zaslugom amatera koji su se njima bavili iz hobija. Tu se radilo o radijski kontroliranim modelarskim avionima, helikopterima, balonima i cepelinima, koji su nekada na sebi nosili i kamere ili fotoaparate.

Prva službeno dokumentirana upotreba bespilotne letjelice za civilnu upotrebu je bila 1979. godine kada tvrtka Hegi izvodi prvi eksperimentalni let za fotogrametrijske potrebe. Letjelica je bila oblika aviona s rasponom krila od 2,6 m te nosivosti od 3 kg. Let nije bio uspješan zbog prevelikih vibracija koje je stvarao rotor na nosu aviona.<sup>3</sup>



*Slika 2: Bespilotna letjelica tvrtke Hegi, 1979.*

*H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich*

Minijaturizacijom i dolaskom digitalne tehnologije smanjuje se veličina kamere, što je bio jedan od glavnih otežavajućih faktora prilikom dizajniranja funkcionalnih bespilotnih letjelica za zračna snimanja. Napretcima na poljima elektrotehnike, računalnih znanosti, i

---

<sup>2</sup>Bloom U., *He lit the lamp: A biography of professor A. M. Low*, Burke, 1958.

<sup>3</sup>Eisenbeiss, *UAV photogrammetry*, 2009, ETH Zurich

pogotovo razvojem GNSS-a (*engl. GNSS = Global Navigation Satellite System*) povećale su se mogućnosti primjene i daljinske kontrole letjelica. Isto tako se povećala i njihova autonomija, te same letjelice postaju lakše i manje. Ubrzo počinje i serijska proizvodnja bespilotnih letjelica za komercijalne svrhe.<sup>4</sup>



*Slika 3: Bespilotna letjelica u letu: DJI Phantom, s GoPro kamerom*

*<http://provideocoalition.com/jfoster/story/product-review-dji-phantom-quadcopter-for-gopro/P2>*

Moderne bespilotne letjelice nisu samo daljinski kontrolirane već su dijelom i roboti. One su opremljene senzorima koji prikupljaju podatke o njihovom okruženju, te ih obrađuju uz pomoć računala na letjelici. Letjelica uz pomoć GPS podataka sama korigira let, te na taj način postiže stabilnost koja je preduvjet za dobru fotografiju ili snimku.<sup>5</sup>

Tehnologija se konstantno prilagođava i razvija kako bi se prilagodila potrebama raznih komercijalnih i znanstvenih područja. Modernije opremljene letjelice posjeduju i mogućnost leta putem autopilota prema prethodno zadanoj ruti, a neke od letjelica posjeduju i stabilizacijske žiroskope, te sonare uz pomoć kojih izvršavaju manevre izbjegavanja.

---

<sup>4</sup>Fahlstrom & Gleason, Introduction to UAV systems, West Sussex, 2012

<sup>5</sup>Siciliano & Khatib, Springer Handbook of Robotics, 2008.



Trenutno na komercialnem tržištu postoji oko 250 različnih modela беспilotnih letjelica, s vrlo širokim mogućnostima primjene.<sup>6</sup>



*Slika 4: Različite vrste беспilotnih letjelica, preuzeto iz:  
H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009., ETH Zurich*

---

<sup>6</sup>Newcome, Unmanned Aviation, AIAA, 2004.

#### 4. Pregled i klasifikacija bespilotnih letjelica

Prema definiciji *UVS (engl. Unmanned Vehicle System) International*, bespilotna letjelica je letjelica koja je dizajnirana da funkcionira bez ljudskog pilota.<sup>7</sup> Najčešći termin u stranoj literaturi kojim se označavaju bespilotne letjelice je UAV (*UAV – engl. Unmanned Aerial Vehicle*), ali postoje i drugi termini kao što su: *engl. RPV – Remotely Piloted Vehicle, ROA – Remotely Operated Aircraft, MAV – Micro Aerial Vehicle, model RC – Remote Controlled, Drone itd.* U stranoj literaturi je još moguće naići i na pojam UAS (*engl. Unmanned Aerial System*) koja podrazumijeva čitav sustav, koji se sastoji od bespilotne letjelice (UAV) i kontrolne stanice (*engl. GCS – Ground Control Station*).<sup>8</sup> U hrvatskom su se u govoru uvriježili pojmovi „dron“ ili za letjelice s rotorima „helikopter“, „kvadrokopter“, „heksakopter“ itd.

Glavna podjela bespilotnih letjelica se bazira na radnoj visini i vremenu leta. Dijelimo ih na dvije osnovne grupe: 1) letjelice koje lete na visini manjoj od 300m i 2) letjelice koje lete na visini većoj od 3000m. Postoji i detaljnija podjela koje je iznesena u tablici (slika 5).<sup>9</sup>

Naziv kategorije (eng.)	Akronim	Težina letjelice [kg]	Doseg leta letjelice [km]	Max. visina leta [m]	Autonomija leta [sati]
Micro	Micro	< 5	< 10	250	1
Mini	Mini	25 - 150	< 10	150 - 300	< 2
Close Range	CR	25 - 150	10 - 30	3000	2 - 4
Short Range	SR	50 - 250	30 - 70	3000	3 - 6
Medium Range	MR	do 1250	70 - 200	5000	6 - 10
Medium Range Endurance	MRE	do 1250	> 500	8000	10 - 18
Low Altitude Deep Penetration	LADP	do 350	> 250	50 - 9000	0,5 - 1
Low Altitude Long Endurance	LALE	< 30	> 500	3000	> 24
Medium Altitude Long Endurance	MALE	do 1500	> 500	14000	24 - 48

*Slika 5: Kategorizacija bespilotnih letjelica po standardu UAVs - International*  
*M. Kolarek, Bespilotne letjelice za potrebe fotogrametrije, Ekscentar, br. 12*

U arheologiji se prvenstveno koristimo letjelicama koje lete do 300m visine, odnosno onima koje prema tablici pripadaju kategorijama micro i mini. Ove vrste letjelica se mogu podijeliti prema njihovim osnovnim karakteristikama. Dijelimo ih na lakše ili teže od zraka,

<sup>7</sup><http://www.uvs-international.org>

<sup>8</sup>Nex & Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014

<sup>9</sup> Kolarek M., Bespilotne letjelice za potrebe fotogrametrije, Ekscentar, br 12

te na one s fleksibilnim, fiksnim ili rotacijskim krilima. Postoje još i različite kategorije uzlijetanja i različite kategorije pogona, prema kojima bi se letjelice mogle pobliže definirati.<sup>10</sup>

U tablici (slika 6) se nalazi klasifikacija letjelica prema njihovom dometu, izdržljivosti, upravljivosti, teretu, te utjecaju vremenskih uvjeta.

Vrsta letjelice	Domet	Izdržljivost	Ovisnost o vremenskim prilikama	Upravljenost	Količina tereta
Balon	+	+++	+	+	++
Cepelin	+++	+++	+	++	+++
Zmaj	++	+	+	+	+
Jedrilica	+++	++	++	++	++
Avion	+++	+++	++	++	+++
Motorni zmaj	+++	++	+	++	++
Helikopter	++	++	++	+++	++
Koaksijalni kopter (2 elise)	++	+++	++	+++	+++
Kvadkopter	+	+	+	+++	+
Multikopter	++	++	++	+++	++

Slika 6: Usporedba različitih tipova bespilotnih letjelica  
(H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009., ETH Zurich)

Letjelice s rotacijskim krilima se mogu zbog svojih izvrsnih manevarskih sposobnosti održavati u zraku u neposrednoj blizini/visini željenoga područja. One s fiksnim krilima mogu ostati dulje u zraku, kretati se na većim visinama te tako i pokriti više terena. Letjelice koje nemaju vlastiti pogon, poput balona, zmaja ili jedrilice su odlične za dugoročno

<sup>10</sup> Eisenbeiss H., UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich

nadziranje određenog područja. Međutim, one su vrlo ovisne o vremenskim prilikama i često su slabo upravljive.<sup>11</sup>

## **5. Primjena u arheologiji**

Primjena bespilotnih letjelica u arheologiji je definirana u sklopu zračne arheologije puno prije pojave samih letjelica. Vrlo je važno razmotriti koju vrstu bespilotne letjelice za što upotrijebiti. Ovisno o performansama iznesenim u tablici (slika 4) i zadatku kojeg želimo ispuniti. Osnovni alat zračne arheologije je zračna fotografija. Ona nam dopušta usporedbe, interpretaciju i kartiranje arheoloških formacija na tlu i nakon leta.<sup>12</sup>

Postoje dvije vrste zračnih fotografija, visoke i niske. Let avionom se u zračnoj arheologiji smatra osnovnom metodom prikupljanja snimki i podataka. Nažalost, prilikom leta avionom vrlo često nije moguće usnimiti arheološki lokalitet vertikalno, a problem predstavlja i brzina kretanja aviona, ograničenost manevrima na malom prostoru i prevelika udaljenost od lokaliteta. Zato nam visoke zračne fotografije ili satelitske snimke služe za pretraživanje većih područja, ali nam nisu adekvatne za snimanje pojedinih lokaliteta ili detalja na lokalitetima prilikom samog iskopavanja. Niske zračne fotografije (*engl. LAAP – Low altitude aerial photography*) nam služe u tu svrhu, i tu bespilotne letjelice dolaze do punog izražaja.<sup>13</sup>

### **5.1. Visoke zračne fotografije – zračna prospekcija**

S obzirom da uspjeh zračne prospekcije ovisi o mnogo različitih faktora, od vremenskih uvjeta do sastava tla na području koje se proučava, standardni let avionom je i dalje najbolja metoda pretraživanja.<sup>14</sup> Potencijal bespilotnih letjelica u području zračne prospekcije je velik, ali slabo iskorišten. Ako je prospekcija u pitanju, najlogičniji izbor bi bila letjelica u obliku aviona. Ona nam dopušta let na većim visinama i dulje vrijeme leta, te tako možemo i pretražiti veće područje. Za razliku od leta sa standardnim avionom, let bespilotne letjelice je

---

<sup>11</sup> Eisenbeiss H., UAV photogrammetry, 2009., ETH Zurich

<sup>12</sup> Scollar I., Archaeological prospecting and remote sensing, Cambridge, 1990.

<sup>13</sup> Verhoeven G.J.J., Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009.

<sup>14</sup> Wilson D.R., Air Photo Interpretation for Archaeologists, Gloucestershire, 2000.

ekonomski puno isplativiji, pa je tako moguće letjeti puno češće, ako je potrebno i više puta dnevno.

Zahvaljujući satelitskim snimkama i snimkama iz aviona s velikih visina koje možemo naći na portalima poput [www.googlemaps.com](http://www.googlemaps.com) ili [www.arkod.hr](http://www.arkod.hr), moguće je prepoznati neke arheološke formacije koje se onda mogu pobliže istražiti s bespilotnom letjelicom.<sup>15</sup> U takvim situacijama nam je dovoljna i bilo koja rotorna letjelica ili balon. Na slici 7 možemo vidjeti usporedbu snimke iz aviona preuzete s portala arkod.hr i snimke snimljene s bespilotnom letjelicom. Na prvoj fotografiji je vegetacija u punom rastu i vidi se zanimljiva arheološka formacija za koju je pretpostavka da se radi o tumulu. Na drugoj fotografiji imamo usnimljeno isto područje s bespilotnom letjelicom u vrijeme oranja, te možemo prepoznati istu formaciju (tumul) na istome mjestu.



*lokalitet kraj autoceste, blizu Varaždina,  
izvor:Arkod*

*<http://preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web/28.02.2014>*



*lokalitet kraj autoceste, blizu Varaždina,  
snimio: M.Vuković*

*Slika 7: Lijevo se nalazi snimka iz aviona preuzeta s portala Arkod, a desno je snimka snimljena bespilotnom letjelicom (kvadkopter)*

## **5.2. Niske zračne fotografije - dokumentacija**

Kako bismo dobili što veću razinu detalja neophodne su nam niske zračne fotografije. Postoje različite metode (platforme) kojima se može doći do ovakve vrste fotografija. Osim

<sup>15</sup> Raczkowski W., Beyond technology do we need meta-aerial archaeology, p211., Aerial Archaeology – Developing future practice, IOS press, 2002

balona, cepelina i zmajeva koji su nam već dugo dostupni za ovakvu vrstu fotografija u ovu svrhu su se koristile i duge ljestve, razne vrste motki i štapova, skele, vatrogasna ili druga servisna vozila, bageri itd. Sve ove metode bi na kraju rezultirale niskom zračnom fotografijom.<sup>16</sup>



*Slika 8: Snimanje s dugačkom motkom, tzv. „žirafa“*

<http://arhaeoblog.blog.siol.net/tag/arheologija/page/3/>

Neke od njih su bile uspješnije od drugih, neke praktičnije, a neke skuplje ili jeftinije. Razvojem bespilotnih letjelica, pogotovo helikoptera i drugih multi-rotornih letjelica, dobili smo praktičan i jednostavan alat za snimanje niskih zračnih fotografija koji i cijenom konkurira dosadašnjim često korištenim balonima i cepelinima.<sup>17</sup> Lansiranjem serijske proizvodnje micro i mini bespilotnih letjelica one su nužno postale jednostavnije za upravljanje kako bi ih se moglo plasirati na što šire tržište. Povećanjem broja korisnika povećala se i konkurencija kod proizvođača koji su se počeli prilagođavati spuštanjem cijena. Tako već za cijenu petnaestak punjenja balona helijem možete dobiti sasvim prihvatljivu multirotornu bespilotnu letjelicu, koja može popratiti istraživanje u cijelosti od početka do

---

<sup>16</sup>Verhoeven G.J.J., Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009

<sup>17</sup>Verhoeven G.J.J., Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009



kraja. To nam otvara nove mogućnosti u dokumentiranju arheološkog iskopavanja.<sup>18</sup> Na ograničenja i probleme s pristupom nailazimo prilikom upotrebe letjelica u šumskim prostorima zbog raslinja, te na visokim vrhovima, zbog jakih vjetrova.

Niske zračne fotografije nam mogu poslužiti u razne dokumentacijske i prezentacijske svrhe na arheološkom lokalitetu, te isto tako pripomoći u interpretaciji. Prezentacijske fotografije koristimo za izlaganja, predavanja, znanstvene radove, knjige i kataloge. Dokumentacijske fotografije nam služe za što točnije bilježenje situacije na terenu, u ovu svrhu su nam najpoželjnije vertikalne fotografije. Vertikalne fotografije lokaliteta možemo iskoristiti za izradu fotonacrta, te na taj način znatno ubrzati proces dokumentacije i izrade nacрта. Postavljanjem seta točaka (foto točke) koje smo prethodno zabilježili u prostoru s totalnom stanicom, dobivamo fotografije koje možemo spajati u mozaik. Nakon što dobijemo cijelu sliku željene strukture ili područja, georeferencirane fotografije iscrtavamo u AutoCAD-u i time dobivamo precizan nacrt puno brže nego koristeći klasične metode dokumentacije (slika 9).<sup>19</sup> Također, može ih se i iskoristiti za snimanje pojedinih nalaza ili detalja arhitekture *in situ*.<sup>20</sup>



*Slika 9: Iscrtavanje nacрта preko poravnane fotografije u AutoCAD-u*

<http://www.jezreelvalleyregionalproject.com/practical-uses-for-photogrammetry-on-archaeological-excavations.html>

<sup>18</sup>Izvor cijena za bespilotne letjelice: <http://kopterworx.com/shop/rtf-ready-to-fly.html> (26.08.2014.)

<sup>19</sup>Summers, Atalan, Aydin, Basagac & Ucar, Documentation of archaeological ruins and standing monuments using photo-rectification and 3D modelling, 2002.

<sup>20</sup>Verhoeven G.J.J., Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009

### 5.3. Snimanje za potrebe izrade fotogrametrijskog 3D modela

U posljednje vrijeme se i konvencionalne granice unutar terenske dokumentacije polako pomiču, zahvaljujući prije svega 3D modelima generiranim iz niskih zračnih fotografija.<sup>21</sup> Naime, snažno računalo u kombinaciji s detaljnim zračnim fotografijama te dobrim softverom može polučiti izvrsne rezultate.<sup>22</sup> Postoji veliki broj različitih programa koji imaju mogućnost generiranja 3D modela iz fotografije; PMVS2, 123D Catch, VisualSFM, AgiSoft PhotoScan, Bundler i Arc3D su samo neki od njih. Agisoft PhotoScan daje odlične rezultate i već ga se koristi kao alat na mnogim istraživanjima.<sup>23, 24</sup> Fotogrametrijski 3D modeli su od iznimne pomoći u arheološkoj dokumentaciji. Oni ne samo da znatno ubrzavaju proces prikupljanja i obrade podataka, nego nam omogućavaju i rekonstruiranje situacije na terenu uz pomoć vrlo kvalitetnih i detaljnih tekstura generiranih iz digitalne fotografije. Čitav proces može napraviti i arheolog na terenu za razliku od laserskih skenera gdje posao snimanja izvršavaju geodeti, postupak obrade podataka traje dugo, a krajnji rezultat često daje loše interpretativne podatke, zbog nedostatka utjecaja arheologa na obradu podataka. Modeli lokaliteta dobiveni ovom metodom polako počinju konkurirati znatno skupljim i kompliciranijim modelima dobivenim laserskim 3D skenerima, to se vrlo jasno može vidjeti na tablici (Slika 10).

---

<sup>21</sup> Verhoeven G.J.J., Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009

<sup>22</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

<sup>23</sup> Roe M., 3D Modelling with AgiSoft Photoscan; Tests to determine the suitability of AgiSoft PhotoScan for archaeological recording, A Meerstone Archaeological Consultancy White Paper, July 2010.

<sup>24</sup> Dell'Unto N., The use of 3D models for intra site investigation in archaeology, BAR int. 2598, p.151, 2014



	<b>Fotogrametrija (</b> modeli izrađeni uz pomoć fotografija)	<b>Lasersko skeniranje</b> (modeli izrađeni uz pomoć laserskog skenera)
<b>Karakteristike</b>		
Cijena instrumenata	Niska	Visoka
Rukovanje/Transport	Izvršno	Dostatno
Vrijeme prikupljanja podataka	Vrlo kratko	Generalno dugo
Vrijeme izrade 3D modela	Kratko, ali je iskustvo nužno	Često dugo
3D podaci	Potrebno preračunavanje uz pomoć softvera	Direktni
Ovisnost o udaljenosti	Neovisno	Ovisno
Ovisnost o dimenziji	Neovisno	Ovisno
Ovisnost o materijalu	Gotovo neovisno	Ovisno
Ovisnost o svjetlosti	Ovisno	Skoro u potpunosti neovisno
Ovisnost o geometriji	Poprilično ovisno	Neovisno
Ovisnost o teksturi	Ovisno	Neovisno
Mjerilo	Nedostaje (naknadni unos)	1:1
Količina podataka	Ovisno o rezoluciji i količini slika	Gusti oblak točaka ( <i>engl. Dense point cloud</i> )
Modeliranje detalja	Dobro/izvršno	Generalno izvršno
Tekstura	Uključena	Nedostaje/ loša rezolucija
Rubovi	Izvršni	Poprilično problematični

Statistika	Za svaku 3D točku	Globalna
“Open-source” softver	Mnogo različitih	Tek nekolicina

*Slika 10: Sinteza fotogrametrijskog snimanja i snimanja s laserskim skenerom, preuzeto iz:*

*Gonizzi Barsanti, F. Remondino D. Visintini, 3D Surveying and modeling of archaeological sites –some critical issues-, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/w1, 2013*

Naravno kombinacijom jedne i druge metode dobivaju se najbolji rezultati, ali s obzirom na već spomenute nedostatke laserskih skenera vrlo je izgledno da će fotogrametrijska izrada 3D modela uz pomoć bespilotne letjelice ubrzo postati vrlo raširena u arheologiji.<sup>25, 26, 27</sup>

Odabir softvera za generiranje 3D modela je iznimno važan. Neki programi će iz istog seta fotografija dati potpuno drugačiji i često nezadovoljavajući 3D model, dok će neki dati rezultat koji se po svemu mogu mjeriti s onima dobivenim iz laserskog skena. U radu „*Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system*“, autora F. Neitzel & J. Klonowski objavljenom u sklopu konferencije o bespilotnim letjelicama u geomatici u Zürichu, iznesena je usporedba 3D modela dobivenih s pet različitih softvera. Kao testni subjekt je poslužilo parkiralište s automobilima snimano s 50m visine, bespilotnom letjelicom tipa oktokopter. Za izradu svih modela je korišten isti set od 99 fotografija, s izvrsnom pokrivenošću testnog subjekta (70% longitudinalnog poklapanja i 60% lateralnog poklapanja). Rezolucija svih fotografija je smanjena s 12 na 3 megapiksela kako bi se smanjila računalna zahtjevnost obrade podataka. U tablici (slika 11) je iznesena komparacija generiranih oblaka točaka.<sup>28</sup>

<sup>25</sup>Eisenbeiss & Zhang, Comparison of DSMs Generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application, ETH Zurich, 2006.

<sup>26</sup> Gonizzi Barsanti, F. Remondino D. Visintini, 3D Surveying and modeling of archaeological sites –some critical issues-, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/w1, 2013

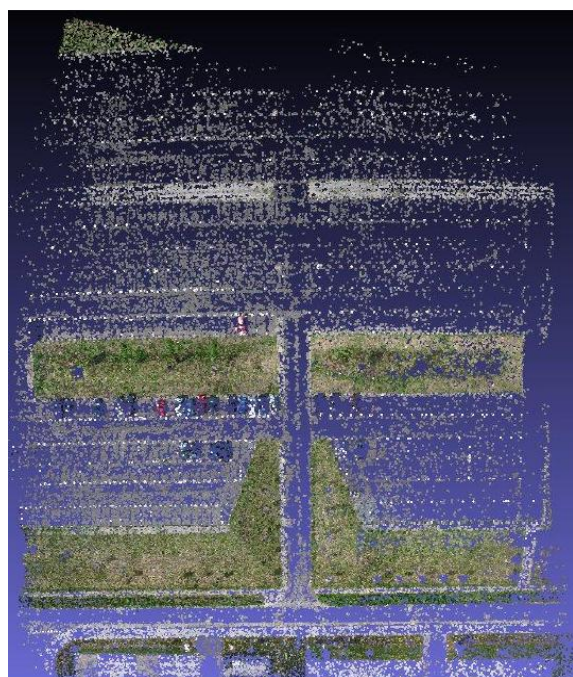
<sup>27</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

<sup>28</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

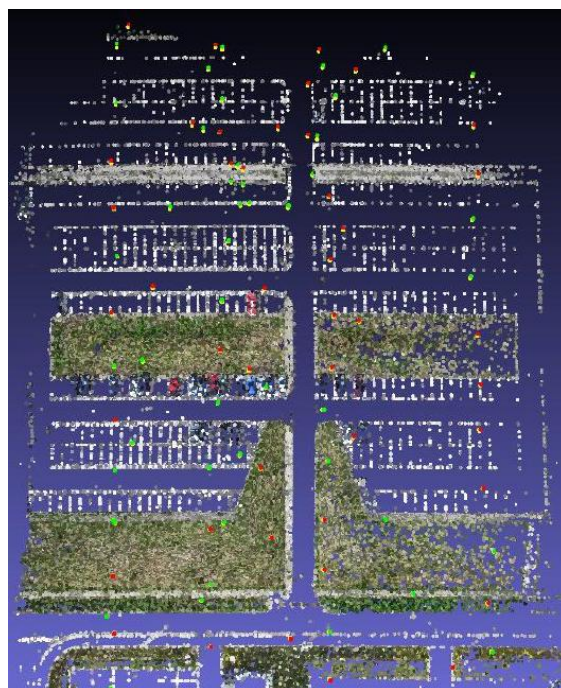
Softver	Ukupna količina točaka	Točaka po m <sup>2</sup>
Photosynth	128535	7
Bundler	125989	8
PMVS2	1,4 milijuna	90
PhotoScan	1,3 milijuna	110
ARC3D	20 milijuna	3000

*Slika 11: Komparacija oblaka točaka dobivenih iz različitih programa, preuzeto iz:  
F.Neitzel, J.Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS  
Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume  
XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011*

Ovdje treba napomenuti da iako je najviše točaka po metru kvadratnom dao rezultat s ARC3D-a, pokrivenost ukupne površine testnog subjekta reprezentirane kroz 3D model je na kraju bila samo 50%, tako da krajnji rezultat sa ARC3D-a nije uopće ušao u užu konkurenciju za najbolji model.



Photosynth

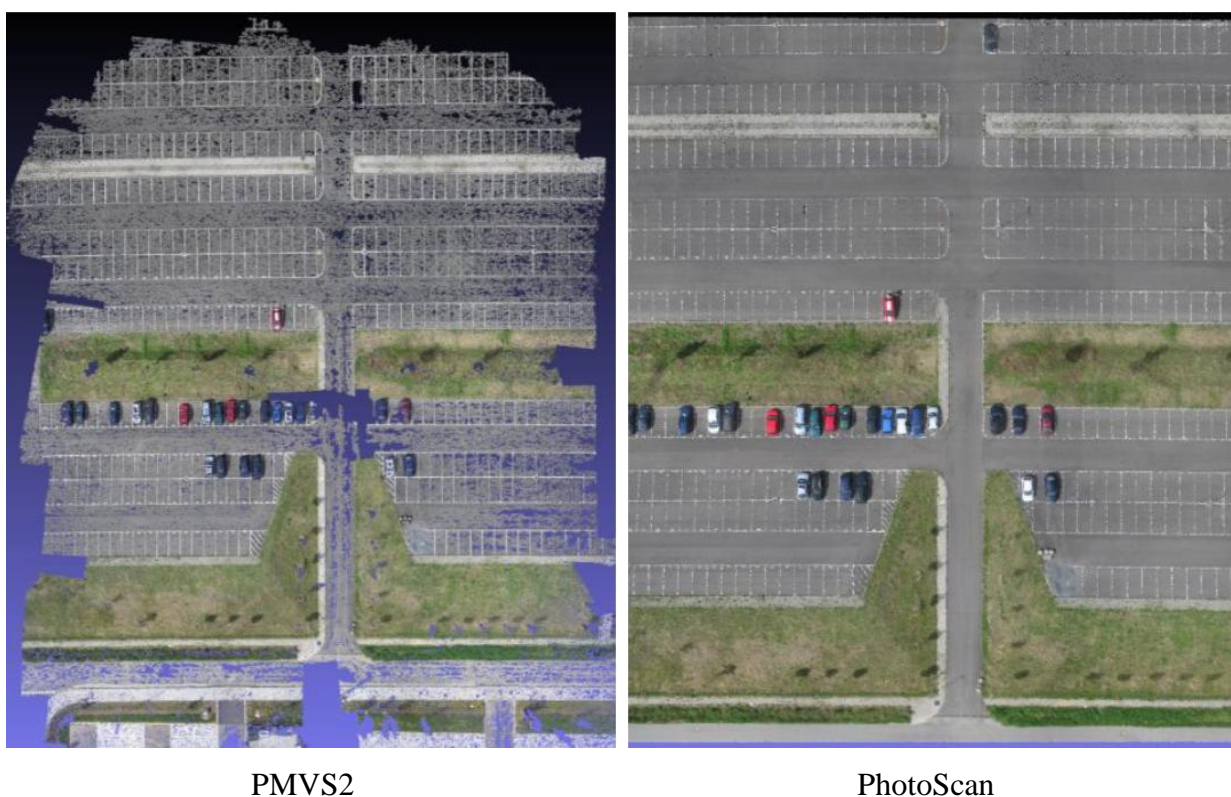


Bundler

*Slika 12: Oblaci točaka dobiveni sa programima Photosynth i Bundler*

*Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011*

Modeli dobiveni pomoću programa *Photosynth* i *Bundler* su vrlo slični i generalno nezadovoljavajući (slika 12), dok su oni dobiveni s *PMVS2* i *PhotoScan*-om puno bolji, te pokrivaju puno veći dio testnog područja. Model dobiven *PMVS2* programom ima još neke manjkavosti i nedostatke, dok je onaj izrađen s *PhotoScan*om donio rezultat bez ikakvih nedostataka (slika 13).<sup>29</sup>



*Slika 13: Oblaci točaka dobiveni programima PMVS2 i AgiSoft PhotoScan*

*F.Neitzel, J.Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011*

<sup>29</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

Izračuni i procesuiranje velike količine podataka koje dobivamo tijekom izrade 3D modela zahtijevaju vrlo snažnu hardversku podršku.<sup>30</sup> S obzirom da najveći teret prilikom obrade podataka pada na virtualnu memoriju (RAM-e) i na procesor (CPU), potrebno je osigurati adekvatnu računalnu opremu. Prema uputama za korištenje programa PhotoScan, količina potrebne virtualne memorije za generiranje modela je ovisna o željenoj kvaliteti i količini fotografija (slika 14).<sup>31</sup>

	Broj fotografija			
Kvaliteta fotografija	20-50	100	200	500
Najniža	100MB-300MB	150MB-450MB	300MB – 1GB	1GB -3GB
Niska	500MB – 1.5GB	750MB – 2.2GB	1.5GB -4.5GB	4GB – 12GB
Srednja	2GB -6 GB	3GB -9 GB	6GB -18 GB	15GB -45 GB
Visoka	8-24 GB	12-36 GB	24-72 GB	60-180 GB
Ultra visoka	32GB-96 GB	48GB- 144GB	96GB -288GB	240GB – 720GB

*Slika 14: Tablica sa prikazanim vrijednostima potrebne virtualne memorije za generiranje 3D modela u programu AgiSoft Photoscan, preuzeto iz: Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0, copyright Agisoft LLC, 2013*

Odabir adekvatnog hardvera za rad s 3D modelima je vrlo bitan. U većini slučajeva je potrebno odabrati konfiguraciju koja nam dopušta ugradnju minimalno 16GB virtualne memorije (RAM-a). Preporučena hardverska konfiguracija računala za rad u PhotoScan-u je:<sup>32, 33</sup>

<sup>30</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

<sup>31</sup> Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0, copyright Agisoft LLC, 2013

<sup>32</sup> Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0, copyright Agisoft LLC, 2013

<sup>33</sup> [http://www.agisoft.ru/wiki/PhotoScan/Tips\\_and\\_Tricks](http://www.agisoft.ru/wiki/PhotoScan/Tips_and_Tricks) (27.08.2014)

**CPU:** Six-core Intel Core i7 CPU, Socket LGA 2011 (Sandy Bridge-E)

**Motherboard:** Any LGA 2011 model with 8 DDR3 slots and at least 1 PCI Express x16 slot

**RAM:** DDR3-1600, 8 x 4 GB (32 GB total) or 8 x 8 GB (64 GB total)

**GPU:** NVidia GeForce GTX 580 / GeForce GTX 680 / GeForce GTX 780 / GeForce GTX TITAN

Osim snažnog računala i dobrog softvera potrebno je imati i kvalitetne fotografije. Naravno, što su fotografije kvalitetnije, to će biti bolji model. Bitno je napomenuti da manji broj fotografija može dati bolji rezultat, pod uvjetom da su pokrivenost i preklapanje visoki. Veći broj fotografija koje su nepotrebne, primjerice mutne fotografije ili fotografije snimljene prilikom polijetanja i slijetanja, treba izbaciti prije generiranja 3D modela.<sup>34</sup>

#### 5.4. Fotografiranje bespilotnom letjelicom i plan leta

Tipično snimanje bespilotnom letjelicom zahtijeva izradu plana leta. Kako bismo što bolje iskoristili vrijeme leta, te dobili što bolje rezultate (fotografije), planiranje leta je nužno. Da bi fotografije ili model bili mjerljivi potrebno je georeferencirati fotografije.<sup>35</sup> Takve fotografije je moguće dobiti na više načina:<sup>36</sup>

- Fotoaparatom koji ima ugrađen GNSS (*engl. GNSS – Global Navigation Satellite System*, tu pripadaju GPS, GLONASS, Galileo, itd.),
- GNSS podacima o ruti leta i poziciji fotografiranja sa same letjelice
- Georeferenciranjem uz pomoć fototočaka

---

<sup>34</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

<sup>35</sup> Neitzel & Klonowski, Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

<sup>36</sup> Nex & Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014



Plan leta ovisi o tome kakve su nam fotografije potrebne. Ponekad nam je dovoljna jedna dobra vertikalna ili kosa fotografija koju možemo iskoristiti za prezentaciju lokaliteta. S druge strane, ako nam fotografije trebaju za izradu 3D modela, tada nam treba čitav set kvalitetnih vertikalnih i kosih fotografija. Letovi bespilotnim letjelicama generalno mogu biti izvedeni na tri načina. Manualni, asistirani i autonomni. Prilikom manualnog upravljanja pilot tijekom čitavog leta, te prilikom slijetanja i uzlijetanja, upravlja letjelicom. Tijekom asistiranog leta pilot uzlijeće i polijeće, a tijekom autonomnog leta letjelica sve sama odrađuje prema prethodno zadanim uputama. Pokazalo se kroz praksu da je za dobru pokrivenost i precizno fotografiranje presudna letjelica koja ima mogućnost makar asistiranog leta uz pomoć GNSS-a. Ovdje je bitno napomenuti da upotreba GNSS sustava na terenu često ovisi o lokaciji, vremenskim uvjetima, i drugim faktorima. Svaki pilot bi trebao biti spreman upravljati letjelicom i bez pomoći GNSS sustava.<sup>37</sup>

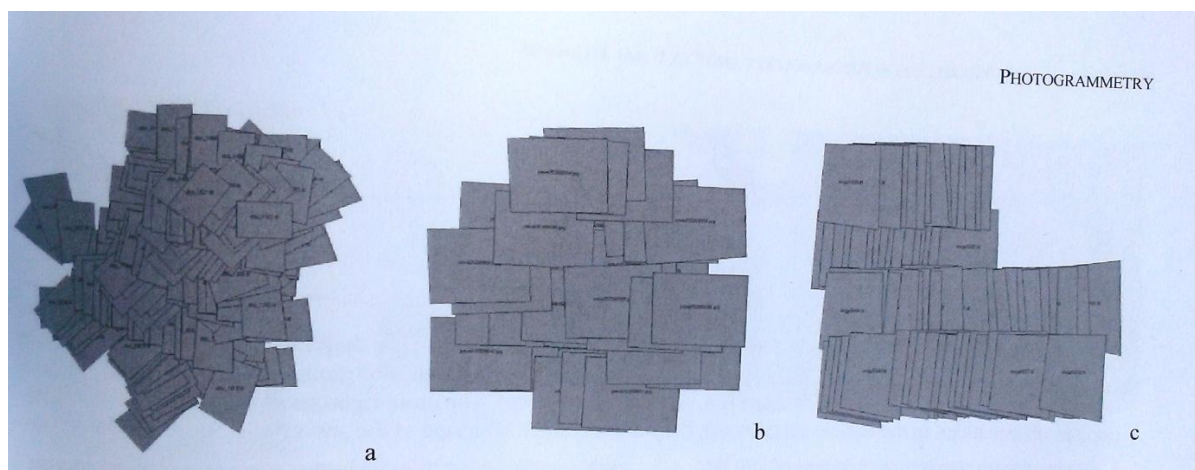
Tijekom leta u autonomnom modu, letjelicu i njezino kretanje možemo nadzirati putem terestrijalne kontrolne stanice (*engl. GCS – Ground Control Station*). Ona nam daje trenutne podatke o visini, poziciji, brzini, udaljenosti, bateriji, brzini okretaja rotora, itd. Putem takve stanice moguće je odrediti i kontrolne točke na kojima se letjelica zaustavi i usnimi fotografiju, te nakon toga nastavi do sljedeće kontrolne točke (slika 15).



<sup>37</sup>Nex & Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014

*Slika 15: Prikaz plana leta sa kontrolnim točkama za bespilotnu letjelicu, napravljen na karti iz GoogleEarth-a; plan je rađen u programu APM:Copter, 3Drobotics, preuzeto sa: <http://copter.ardupilot.com/>*

Letjelice kojima upravljamo u potpunosti manualno često su cjenovno prihvatljivije od poluautonomnih ili autonomnih, ali su svojom nosivošću, vremenom leta i veličinom ograničene na upotrebu kompaktnih digitalnih fotoaparata koji okidaju fotografije u pravilnim vremenskim intervalima.<sup>38</sup> To dosta često rezultira lošijim fotografijama, te nedovoljnim poklapanjem ili krivim kadrom, jer se u pravilu snima „naslijepo“. U takvim situacijama nam je potreban veći broj letova kako bismo postigli željeni rezultat (slika 16).



*Slika 16: Grafički prikaz različitih modaliteta snimanja: a) let u manualnom modu i snimanje po pravilnim vremenskim intervalima; b) autonomni let s navigacijskim sustavom niže kvalitete; c) autonomni let s vrlo preciznim navigacijskim sustavom više kvalitete; preuzeto iz:*

*Nex & Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014*

Performanse bespilotnih letjelica zavise o njihovoj veličini, opremljenosti i kvaliteti. Kao i u svemu ovi faktori utječu na cijenu same letjelice. Iako se s jeftinim i manualno kontroliranim letjelicama može postići mnogo, za vrhunske rezultate bi ipak valjalo pribjeći

<sup>38</sup>.Nex & .Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014



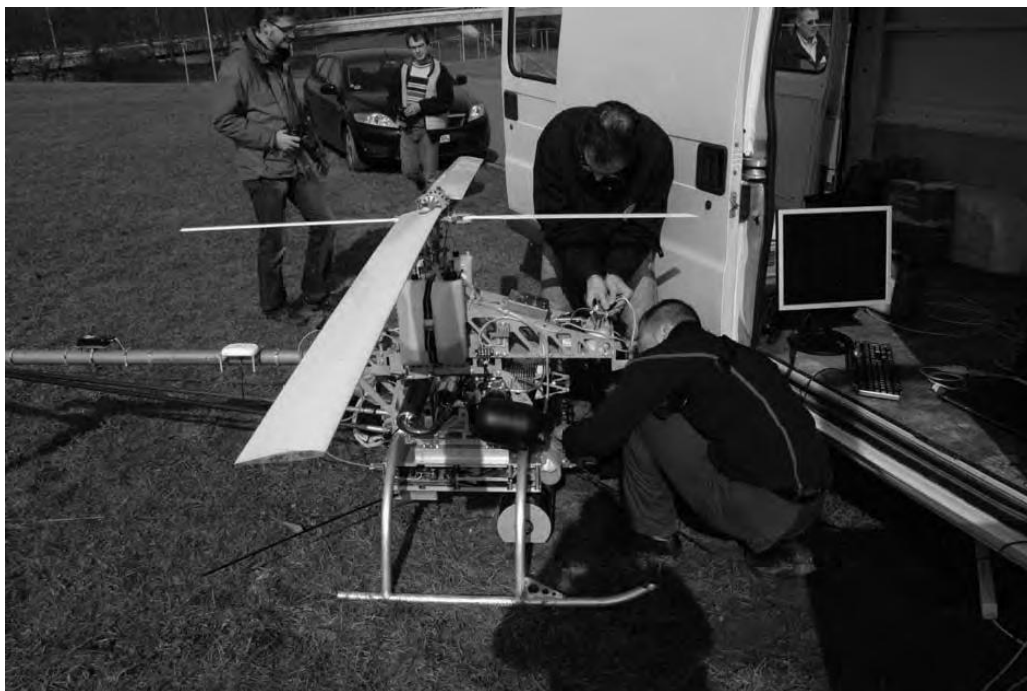
većim i kvalitetnijim letjelicama s mogućnošću preciznog autonomnog leta. Veće letjelice su nužno i teže pa su samim time i stabilnije u zraku, pogotovo tijekom nepovoljnih vremenskih uvjeta, iako ako se pravilno koriste, ne bi trebalo doći do nekih nezgoda i padova uvijek postoji opasnost da nešto pođe po zlu. Imajući to na umu trebalo bi uvijek u pripremi imati zamjensku letjelicu kako ne bismo ostali bez važnih podataka s terena.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup>Nex & Remondino, UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014

### 5.5. Prikupljanje podataka drugim metodama (termalne, infracrvene i video kamere; LiDAR ili laserski skener)

Laserski skeneri (LiDAR) su aktivni instrumenti za mjerenje koji mogu generirati oblake točaka s 3D koordinatama za svaku točku. Postoje terestrijalni i zračni skeneri. S obzirom da zračni skeneri zahtijevaju vrlo precizni GNSS uređaj znatno su skuplji od terestrijalnih. Laserske skenere je moguće uspješno montirati na bespilotnu letjelicu. Sama letjelica mora biti u mogućnosti nositi dodatnu težinu i biti prilagođena za duže, više i sigurnije letove od onih koji se mogu ostvariti letjelicama iz micro UAV kategorije. Najbolji primjer je potpuno autonomna letjelica *Scout B1-100* dizajnirana da nosi Riegl LiDAR skener LMS-Q160. Radi se o potpuno autonomnom helikopteru koji može nositi od 18 do 20 kilograma, s vremenom leta od 90 minuta.<sup>40</sup>



*Slika 17: Pripremanje letjelice Scout B1-100 opremljene zračnim laserskim skenerom Riegl LMS-Q160, kod kampusa Honggerberg (ETH Zurich); preuzeto iz: H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich*

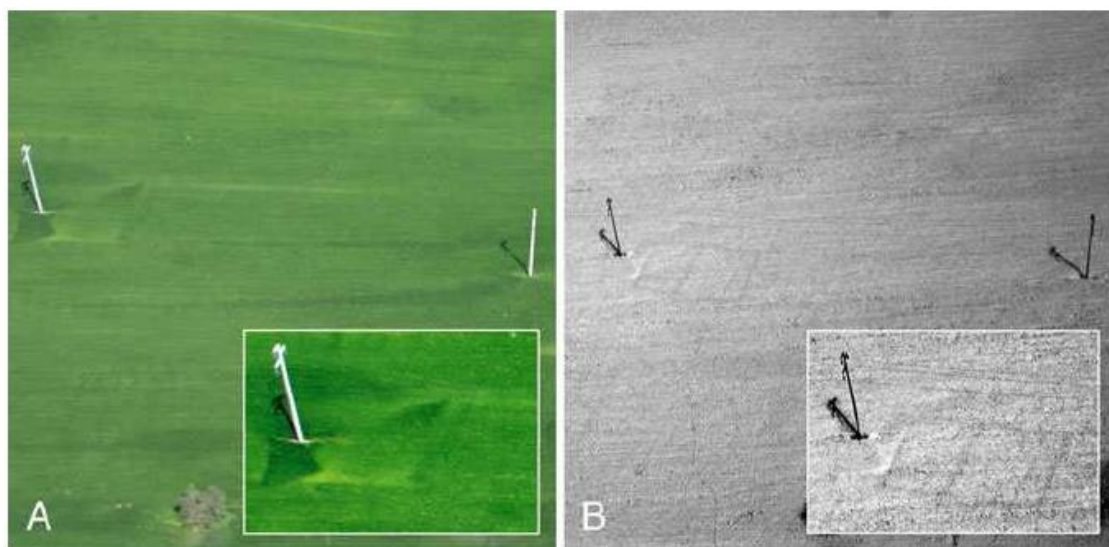
<sup>40</sup>Eisenbeiss H., UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich

Letjelica s laserskim skenerom je testirana kod kampusa Honggerberg u Zurichu i rezultati su pokazali enormni potencijal za budućnost, pogotovo ako bi se paralelno moglo odraditi i lasersko i fotografsko snimanje i na taj način objediniti obje metode.<sup>41</sup>

Infracrvene i termalne kamere se obično koriste na bespilotnim avionima, jer nam u većini slučajeva ovakve vrste snimaka koriste za pretraživanje i detekciju. U arheologiji je potencijalna primjena u sferi zračne prospekcije. Naime, bliske infracrvene (*engl. NIR – Near Infra Red* 0,78 – 3  $\mu\text{m}$ ) zrake probijaju dublje kroz biljku od obične svjetlosti i daju nam više informacija, što može rezultirati prepoznavanjem arheoloških formacija u vegetaciji koje prije nisu bile vidljive (slika 18).<sup>42</sup>

Video kamere nam mogu poslužiti za snimanje prezentacijskog i promotivnog materijala s atraktivnim zračnim kadrovima, te nam mogu pomoći i prilikom pretraživanja iz zraka, ako nemamo direktnu video-vezu na tlu.

Termalne kamere koriste nam u prepoznavanju arheoloških tragova na zemlji, pogotovo nakon jakih kiša kada nas zadržavanje ili nedostatak vlage na nekom području mogu uputiti na arheološki relevantnu aktivnost pod površinom.



Slika 18: a) Normalna fotografija; b) NIR (*engl. Near Infra Red*), infracrvena fotografija; preuzeto iz: G.J.Verhoeven, *Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations*, *J Archaeol Method Theory*, 2012

<sup>41</sup>Eisenbeiss H., UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich

<sup>42</sup>Verhoeven G.J., *Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations*, *J Archaeol Method Theory*, 2012

## 6. Studija slučaja

S ciljem potvrđivanja teza iznesenih u ovome radu, u svibnju 2013. godine, započeo sam s radom na arheološkom dokumentiranju koristeći vlastitu bespilotnu letjelicu.

U početku su snimanja vršena u svrhu objave ili izrade prezentacijskih fotografija na izložbama, a ubrzo su se proširila i na arheološku dokumentaciju u vidu snimanja ortofotografija nalazišta za potrebe izrade nacrt lokaliteta. Sljedeći logični korak je bio povezivanje zračnih fotografija i inovativnih softvera za izradu fotogrametrijskih trodimenzionalnih modela arheoloških nalazišta.

Prvi korak je bio odabir adekvatne letjelice. S obzirom na pristupačnu cijenu i odlične preformanse za tako malu letjelicu, odlučio sam se za model kvadrokoptera Phantom od tvrtke DJI. Sama letjelica se u praksi pokazala odličnim odabirom. Jednostavna je za upravljanje, lagana za transport, ali svejedno stabilna u zraku, vrlo izdržljiva na udarce i padove, te je opremljena vrhunskim navigacijskim sustavom koji olakšava upravljanje. Autonomija (vrijeme leta) je oko 10 - 12 min na starijem modelu, te 20 – 22 min na novijem modelu. Efektivna nosivost je do 1 kg, međutim, što je veći teret, to je i manja autonomija leta. Letjelica je opremljena i autopilotom u slučaju gubitka radio veze s upravljačkom stanicom.<sup>43</sup> Imao sam ju prilike koristiti u raznim ekstremnim uvjetima, kao što su jaki i olujni vjetrovi, kiša, te čak i let unutar šume ili nekih objekata. Svaki lokalitet na kojem sam snimao je pružio novo iskustvo što se tiče načina leta, upravljanja i pripreme prije samog snimanja.

Za razliku od klasičnih sustava za snimanje iz zraka, navedeni model nije bio opremljen daljinskim okidačem i video slikom na zemlji. Iz tog su razloga svi letovi izvršeni naslijepo. Premda ova metoda ima svoje očite nedostatke, s druge strane je mnogo jeftinija te zahtijeva samo jednog operatera bespilotne letjelice.

Drugi korak je bio odabir fotoaparata. Inicijalni odabir je pao na kameru GoPro Hero3 Black edition. Ona je odabrana zbog svoje male težine, vrhunske rezolucije slike, te vrlo kratkog vremenskog intervala između okidanja fotografija od čak 0.5sec.<sup>44</sup> Iako se ova kamera pokazala odlična u prezentacijskom smislu, nije zadovoljila standarde preciznosti za arheološku dokumentaciju. Prvenstveni krivac je bila širokokutna (*engl. fish-eye*) leća od

---

<sup>43</sup> Specifikacije: <http://www.dji.com/product/phantom>

<sup>44</sup> Specifikacije: <http://www.gopro.com>

180° koja je krivila oko 50% sadržaja na fotografiji, što je automatski diskvalificiralo ovakve fotografije za preklapanje i izradu nacrtu u AutoCAD-u. Nakon što sam testirao nekoliko različitih kamera od raznih proizvođača (Sony, Pentax, Panasonic) došao sam napokon do fotoaparata RicohGR. Ovaj kompaktni fotoaparat se pokazao kao odličan odabir zbog svojih sposobnosti snimanja fotografija vrlo visoke rezolucije, bez znatnih krivljenja slike. Veličina senzora i kvaliteta fotografija odgovaraju višem razredu SLR fotoaparata. Sposobnost okidanja fotografija u RAW + JPEG formatu daje puno više mogućnosti što se tiče naknadne obrade fotografija. Aparat se pokazao kao odličan odabir na terenu za arheološku dokumentaciju.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> Specifikacije: [http://www.us.ricoh-imaging.com/digital-camera/RICOH\\_GR](http://www.us.ricoh-imaging.com/digital-camera/RICOH_GR)

## 6.1. Primjeri iz prakse

U nastavku poglavlja slijedi nekoliko konkretnih primjera primjene bespilotnih letjelica u arheološkoj dokumentaciji. Radi boljeg pregleda fotografije su podijeljene na četiri različite kategorije: prezentacijske, u svrhu zračne prospekcije, u svrhu izrade nacrti i u svrhu izrade 3D modela.

### 6.1.1. Prezentacijske fotografije

U rujnu 2013. godine izvršeno je snimanje završnog stanja iskopavanja Koprivničkih bedema koje provodi Muzej grada Koprivnice, pod vodstvom višeg kustosa Roberta Čimina. Ovakva vrsta prezentacijske fotografije arheološkog nalazišta nam omogućava detaljniji uvid u završnu situaciju na terenu. Same fotografije se naknadno mogu iskoristiti za razne objave i izložbe, te tako na adekvatan način prezentirati arheološka istraživanja.



Slika 19: Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta Koprivnički bedemi, u Koprivnici, Muzej grada Koprivnice, pod vodstvom višeg kustosa Roberta Čimina, snimio: M. Vuković



U listopadu 2013. godine izvršeno je snimanje iz zraka za Arheološki muzej u Zagrebu u Varaždinskim Toplicama, pod vodstvom više kustosice Dore Kušan. Na fotografijama se nalazi kasno antički kompleks s posebnim naglaskom na bazen iz kojega izvire termalna voda u središtu nekadašnjeg svetišta. Fotografije su kasnije iskorištene u prezentacijske svrhe na izložbi „Aquae Iasae – najnovija arheološka otkrića u Varaždinskim Toplicama“, održanoj u Ljubljani u Cankarjevom Domu od svibnja do listopada 2014. godine.



Slika 20: Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta V. Toplice, Arheološki muzej u Zagrebu, pod vodstvom više kustosice Dore Kušan, snimio: M.Vuković



Slika 21: Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta V. Toplice, Arheološki muzej u Zagrebu, pod vodstvom više kustosice Dore Kušan, snimio: M.Vuković

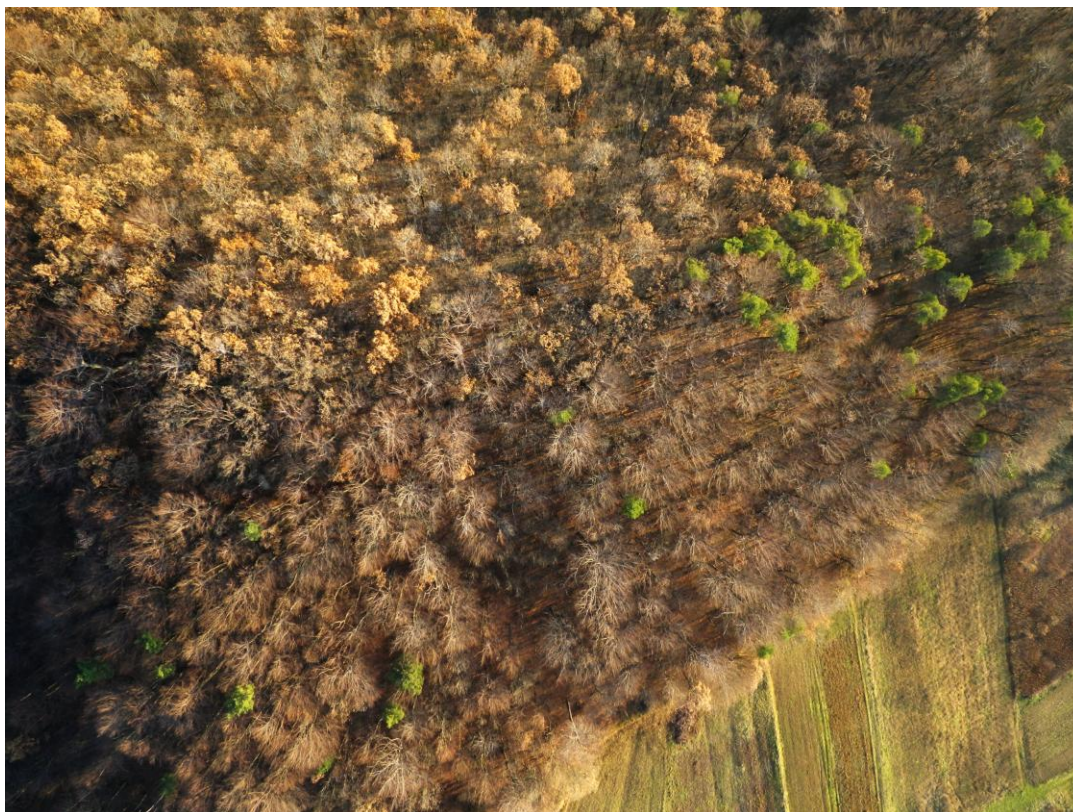
### 6.1.2. Zračna prospekcija

U području zračne prospekcije manje rotorne letjelice imaju izniman potencijal. One nam omogućavaju da nadgledamo promjene u prirodi koje se manifestiraju zbog arheološki relevantnih ostataka ispod površine (slika 7 i 21). Isto tako nam omogućuju da istražujemo teško dostupna područja, kao što su na primjer podvodni lokaliteti.

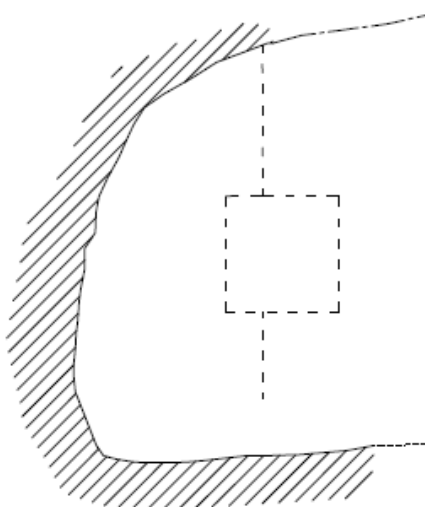
U prosincu 2013. godine izvršeno je snimanje iz zraka za Gradski muzej u Varaždinu na lokalitetu Podrute. Prilikom površinskog pregleda utvrđeno je postojanje obrambenog opkopa na sjevernoj strani uzvisine, te mogući ostaci arhitekture na najvišoj točki. Cilj snimanja je bio pokušati utvrditi gabarite potencijalnog lokaliteta na zračnoj fotografiji, kako bi se što bolje pozicionirale arheološke sonde u budućnosti. Na prvi pogled je bilo teško zamjetiti nešto na fotografijama zbog guste šume koja raste na uzvisini. Međutim detaljnija analiza je



otkrila opkop, gabarite samoga platoa na uzvisini i ostatke arhitekture koji su djelomično vidljivi.



Slika 22: Zračna fotografija snimljena u svrhu arheološke prospekcije, Gradski muzej Varaždin, više kustosice Marine Šimek, snimio: M.Vuković



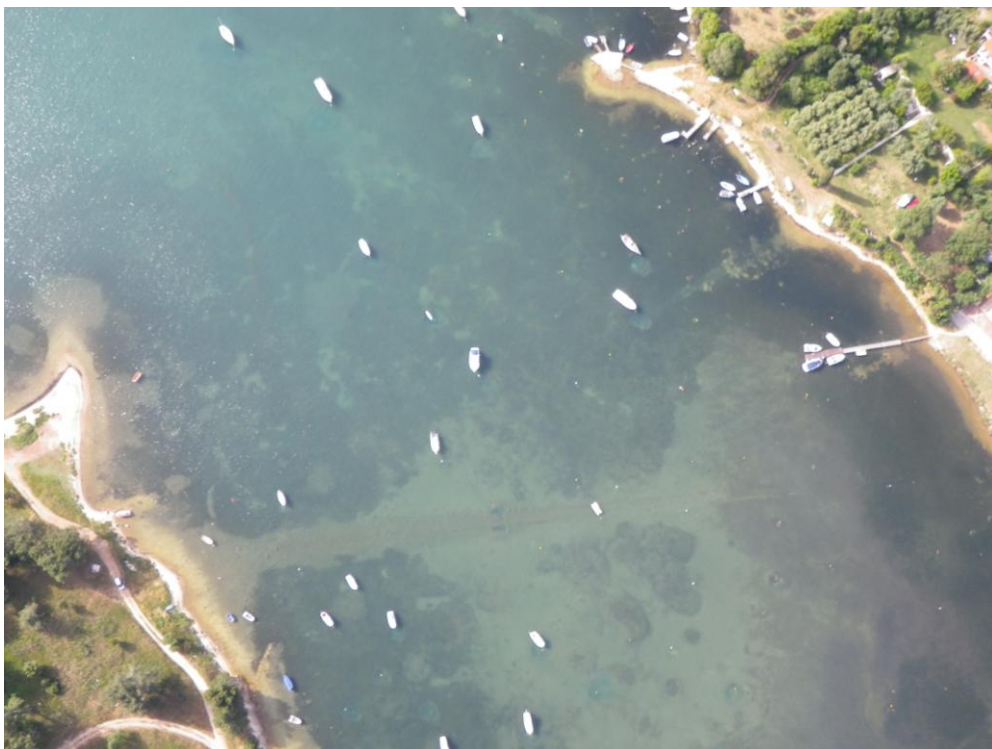
Slika 23: Skica izrađena iz zračne fotografije; linijama je naznačena pozicija opkopa, a iscrtkanom linijom su naznačeni ostaci arhitekture, izradio M.Vuković

Dobar primjer snimanja teško dostupnih lokacija je bilo snimanje na poluotoku Vižuli kraj Medulina. U suradnji s podvodnim odjelom Hrvatskog restauratorskog zavoda izvršen je niz snimanja obalnog pojasa poluotoka, na kojem se u kasnoj antici nalazila rimska vila. S obzirom na podizanje razine mora od antičkog vremena do danas i specifičnu geološku situaciju u ovome zaljevu, neki dijelovi ove vile i njenih popratnih objekata se danas nalaze pod morem na dubini od 3-5 metara. Podvodni odjel HRZ-a pod vodstvom višeg konzervatora Igora Miholjeka izvršio je niz istraživanja na jugozapadnoj strani poluotoka gdje je pronađeno kasnoantičko pristanište s nizom popratnih objekata (slika 26 - E i F). Jedno kraće istraživanje na istočnoj strani poluotoka rezultiralo je pronalaskom rimske ceste (slika 26 – H) koja je povezivala vilu s okolicom. Sama cesta se odlično vidi na zračnim fotografijama, a vide se čak i dvije arheološke sonde uz nasuprotne rubove na sredini ceste. Fotografije su kasnije iskorištene na izložbi „Antički sjaj općine Medulin“, te su izašle u istoimenom katalogu.



Slika 24: Rimska cesta (objekt H) pod morem u Medulinskom zaljevu, poluotok Vižula, Hrvatski restauratorski zavod, pod vodstvom višeg konzervatora Igora Miholjeka, snimio: M.Vuković





Slika 25: Fotografija usnimljena u svrhu utvrđivanja točne pozicije antičke ceste, Vižula (objekt H), pod vodstvom višeg konzervatora Igora Miholjeka, Hrvatski restauratorski zavod, snimio: M.Vuković



Slika 26: Vižula, ortofoto – arhiv HRZ-a



### 6.1.3. Fotografiranje za potrebe izrade nacrtu

Upotrebom bespilotnih letjelica na istraživanjima znatno se ubrzava proces dokumentacije. Korištenjem metode georeferenciranja fotografija uz pomoć fototočaka moguće je unijeti ortofotografiju u programe kao što je AutoCAD, i u njima izraditi nacrtu dokumentaciju lokaliteta. Ovom metodom ubrzavamo sami proces dokumentiranja zbog manje zahtjevnog postupka crtanja, manjeg broja potrebnih točaka uzetih totalnom stanicom na terenu, i manjeg prostora za pogreške. U praksi se pokazalo od iznimne koristi imati letjelicu na terenu tokom cijelog istraživanja jer je na taj način moguće brzo i precizno dokumentirati svaki sloj.

Na lokalitetu Gardun kraj Trilja u srpnju 2014. izvršena su snimanja u svrhu izrade nacrtu lokaliteta u AutoCAD-u. Istraživanje je provedeno pod vodstvom prof. dr. Mirjane Sanader.



Slika 27: Fotografirano za potrebe izrade nacrtu u AutoCAD-u, Gardun - Tilurij, FFZG, Odsjek za arheologiju; voditelj: prof. dr. Mirjana Sanader, snimio: M.Vuković



Slika 25: Nacrt lokaliteta u AutoCAD-u izrađen pomoću zračne fotografije, izradila: dr.sc.  
Ina Miloglav

U studenom 2013. snimane su gomile u blizini sela Mravinjica kraj Slanoga. Projekt su financirali Dubrovački muzeji, a uključivao je izradu nacrtne i 3D dokumentacije za arheološki relevantan prostor popunjen s 11 gomila. Uz pomoć male rotorne letjelice uspješno je dokumentiran čitav prostor, te su izrađeni nacrti svih gomila. Projekt je realiziran pod vodstvom kustosa dr. sc. Domagoja Perkića iz Dubrovačkih muzeja, a u suradnji sa Robertom Čiminom iz Muzeja grada Koprivnice.





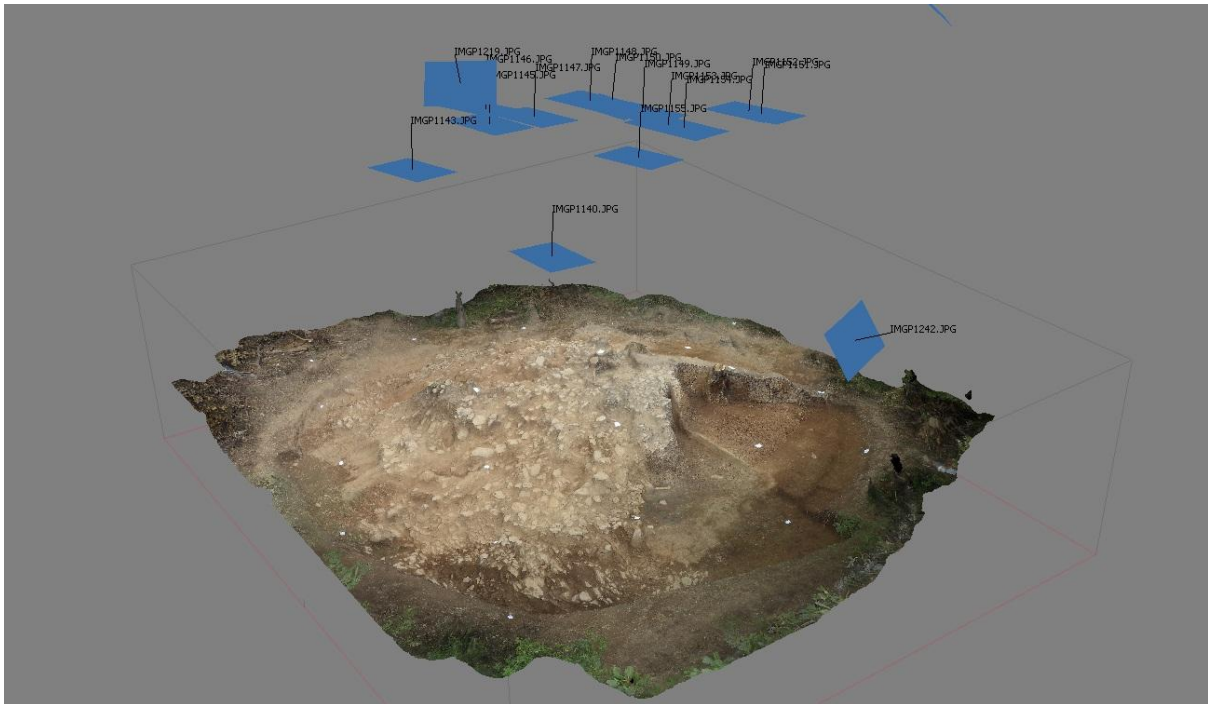
#### 6.1.4. Fotografiranje za potrebe izrade fotogrametrijskog 3D modela

Niz vertikalnih i bočnih zračnih stereo fotografija s velikim preklopom (50%) nam omogućava izradu fotogrametrijskog modela nalazišta. U praksi se ova metoda dokumentacije pokazala kao najbolja. Na taj način nam situacija s terena, koja je neminovno uništena arheološkim iskopavanjima, ostaje sačuvana u digitalnom obliku. Iz takvog georeferenciranog modela visoke rezolucije vrlo je lako napraviti nacrtanu dokumentaciju, ako je ona potrebna. Zbog većeg broja potrebnih fotografija vremenski je ova metoda zahtjevnija od metode iscrtavanja preko fotografije, međutim ona nam osim mnogo detalja pruža i mogućnost upotrebe modela nalazišta za kasnije idealne rekonstrukcije i prezentaciju.

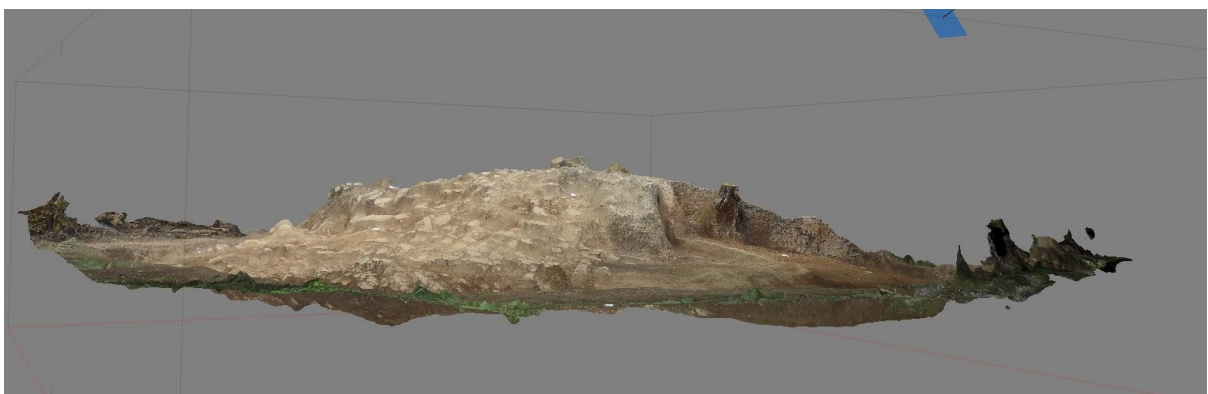
U srpnju 2014. snimljen je tumul na lokalitetu Vetovo-Kagovac u Požeškoj kotlini, u sklopu istraživanja koje je provodio Centar za prapovijesna istraživanja, pod vodstvom prof. Hrvoja Potrebice. Premda je inicijalna ideja bila da se izrade samo fotografije za iscrtavanje u AutoCAD-u, na licu mjesta je odlučeno da se uzme i veći broj fotografija, koji bi bio adekvatan za izradu fotogrametrijskog modela. Na slici (slika 28) se nalazi usporedba obične fotografije i slike 3D modela iz iste pozicije gdje je očita minimalna razlika u detaljima u korist 3D modela. Daljnje slike prikazuju 3D model tumula iz više različitih kutova, kako bi se što bolje prikazale mogućnosti ove vrste dokumentacije.



Slika 28: Na lijevoj strani se nalazi slika 3D modela tumula, a na desnoj strani zračna fotografija sa nalazišta; Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković



Slika 29: Bočni pogled na tumul, slika 3D modela, Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković



Slika 30: Pogled sa površine, slika 3D modela, Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković



## 7. Zaključak

Bespilotne letjelice polako postaju vrlo bitan arheološki alat. Jednostavne manualne letjelice niskog cjenovnog ranga nam vrlo često mogu dati sasvim zadovoljavajuće rezultate. Ubrzavaju proces dokumentacije, daju nam odlične prezentacijske fotografije ili video, te nam u nekim slučajevima mogu poslužiti i kao alat za zračno pretraživanje terena. Svojom jednostavnošću, lakim upravljanjem i niskom cijenom lako konkuriraju drugim metodama fotografiranja na niskim visinama kao što su fotografiranje motkom, sa skele, s ljestava itd. Tehnološkim razvojem rotornih sustava, letjelice poput helikoptera, „kvadkoptera“, „heksakoptera“ i „oktokoptera“ su polako zamijenile dosadašnju praksu korištenja balona i cepelina na arheološkim istraživanjima. Bez obzira na njihove nedostatke kao što su kratko vrijeme leta i kratki domet, rotorne letjelice su se pokazale kao odličan alat na arheološkim istraživanjima zbog njihove vrlo dobre upravljivosti, mogućnosti vrlo niskog leta, te vertikalnog uzlijetanja i slijetanja.

Kompliciraniji autonomni bespilotni sustavi se sastoje od same letjelice i kontrolne stanice na tlu, te su zbog količine i sofisticiranosti opreme u znatno višem cjenovom razredu od onih manualnih. Autonomni sustavi nam mogu donijeti kvalitetnije rezultate u puno kraćem vremenskom roku od manualnih, s kojima je često potrebno izvršiti i više letova kako bi postigli željeni rezultat. Bespilotne letjelice ove klase često imaju veću nosivost i samim time mogu nositi bolje i kvalitetnije senzore. One mogu dulje i dalje letjeti, te su često stabilnije i pouzdanije od manjih manualnih sustava.

Odabir letjelice ili cijelog bespilotnog autonomnog sustava ovisi prije svega o financijskim mogućnostima, ali i o potrebama arheologa na terenu. Ovisno o metodama dokumentacije i željenim rezultatima arheolozi moraju prilagoditi svoje kriterije odabira letjelice, sustava kontrole i senzora svojim potrebama.

Daljnjim razvojem na poljima digitalne fotografije, laserskih skenera i izrade fotogrametrijskih 3D modela, bespilotne letjelice će dobivati sve veću ulogu u arheologiji.

## 8. Literatura

Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0, copyright Agisoft LLC, 2013.

Bloom U., *He lit the lamp: A biography of professor A.M. Low*, Burke 1958.

Dell'Unto N., *The use of 3D models for intra site investigation in archaeology*, BAR int. 2598, p.151, 2014.

Eisenbeiss H., *UAV photogrammetry, 2009.*, ETH Zurich

Eisenbeiss & Zhang, *Comparison of DSMs Generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application*, ETH Zurich, 2006.

Fahlstrom & Gleason, *Introduction to UAV systems*, West Sussex, 2012.

Gonizzi Barsanti, Remondino & Visintini, *3D Surveying and modeling of archaeological sites –some critical issues–*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/w1, 2013.

Kolarek M., *Bespilotne letjelice za potrebe fotogrametrije*, Ekscentar, br. 12.

Neitzel & Klonowski, *Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011.

Newcome L., *Unmanned Aviation*, AIAA, 2004.

Nex & Remondino, *UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing*, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014

Raczkowski W., *Beyond technology do we need meta-aerial archaeology*, p 211.,  
Aerial Archaeology – Developing future practice, IOS press, 2002.

Roe M., *3D Modeling with AgiSoft Photoscan; Tests to determine the suitability of AgiSoft PhotoScan for archaeological recording*, A Meerstone Archaeological Consultancy White Paper, July 2010.

Scollar I., *Archaeological prospecting and remote sensing*, Cambridge, 1990.

Siciliano B & Khatib O, *Springer Handbook of Robotics*, 2008.

Summers, Atalan, Aydin, Basagac & Ucar, *Documentation of archaeological ruins and standing monuments using photo-rectification and 3D modeling*, 2002.

Verhoeven G.J., *Providing an Archaeological Bird's-eye View an Overall Picture of Ground based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology*, Archaeological Prospection, br. 16, p. 233-249, 2009.

Verhoeven G.J., *Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations*, J Archaeol Method Theory, 2012.

Wilson D.R., *Air Photo Interpretation for Archaeologists*, Gloucestershire, 2000.

.

## 9. Popis slika

**Slika 1:** „Kettering Bug“; [http://en.wikipedia.org/wiki/Kettering\\_Bug](http://en.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug)

**Slika 2:** *Bespilotna letjelica tvrtke Hagi, 1979.* H. Eisenbeiss, *UAV photogrammetry*, 2009, ETH Zurich

**Slika 3:** *Bespilotna letjelica u letu: DJI Phantom, sa GoPro kamerom;* <http://provideocoalition.com/jfoster/story/product-review-dji-phantom-quadcopter-for-gopro/P2>

**Slika 4:** *Različite vrste bespilotnih letjelica, preuzeto iz: H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich*

**Slika 5:** *Kategorizacija bespilotnih letjelica po standardu UAVs – International, preuzeto iz: M. Kolarek, Bespilotne letjelice za potrebe fotogrametrije, Ekscentar, br 12*

**Slika 6:** *Usporedba različitih tipova bespilotnih letjelica (H. Eisenbeiss, UAV photogrammetry, 2009, ETH Zurich)*

**Slika 7:** *Lijevo (a) se nalazi snimka iz aviona preuzeta s portala Arkod, a desno(b) je snimka snimljena bespilotnom letjelicom (kvadkopter); a) lokalitet kraj autoceste, blizu Varaždina, izvor: Arkod <http://preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web/28.02.2014>, b) lokalitet kraj autoceste, blizu Varaždina, snimio: M.Vuković*

**Slika 8:** *Snimanje s dugačkom motkom, tzv. „žirafa“;* <http://arhaeoblog.blog.siol.net/tag/arheologija/page/3/>

**Slika 9:** *Isctavanje nacrtu preko poravnane fotografije u AutoCAD-u* <http://www.jezreelvalleyregionalproject.com/practical-uses-for-photogrammetry-on-archaeological-excavations.html>

**Slika 10:** *Sinteza fotogrametrijskog snimanja i snimanja s laserskim skenerom, preuzeto iz: S. Gonizzi Barsanti, F. Remondino D. Visintini, 3D Surveying and modeling of archaeological sites –some critical issues-, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/w1, 2013*

**Slika 11:** Komparacija oblaka točaka dobivenih iz različitih programa, preuzeto iz: F. Neitzel, J. Klonowski, *Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

**Slika 12:** Oblaci točaka dobiveni sa programima Photosynth i Bundler, preuzeto iz: F. Neitzel, J. Klonowski, *Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

**Slika 13:** Oblaci točaka dobiveni programima PMVS2 i AgiSoft PhotoScan, preuzeto iz: F. Neitzel, J. Klonowski, *Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, 2011

**Slika 14:** Tablica s prikazanim vrijednostima potrebne virtualne memorije za generiranje 3D modela u programu AgiSoft Photoscan, preuzeto iz: Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0, copyright Agisoft LLC, 2013

**Slika 15:** Prikaz plana leta sa kontrolnim točkama za bespilotnu letjelicu, napravljen na karti iz GoogleEarth; plan je rađen u programu APM:Copter, 3Drobotics, preuzeto sa: <http://copter.ardupilot.com/>

**Slika 16:** Grafički prikaz različitih modaliteta snimanja: a) let u manualnom modu i snimanje po pravilnim vremenskim intervalima; b) autonomni let s navigacijskim sustavom niže kvalitete; c) autonomni let s vrlo preciznim navigacijskim sustavom više kvalitete; preuzeto iz: F. Nex, F. Remondino, *UAV: Platforms, Regulations, Data acquisition and processing*, p.73-86, BAR Int. 2598, 2014

**Slika 17:** Pripremanje letjelice Scout B1-100 opremljene zračnim laserskim skenerom Riegl LMS-Q160, kod kampusa Honggerberg (ETH Zurich); preuzeto iz: H. Eisenbeiss, *UAV photogrammetry*, 2009, ETH Zurich

**Slika 18:** a) Normalna fotografija; b) NIR (engl. Near Infra Red), infracrvena fotografija; preuzeto iz: G. J. Verhoeven, *Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations*, *J Archaeol Method Theory*, 2012

**Slika 19:** Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta Koprivnički bedemi, u Koprivnici, Muzej grada Koprivnice, pod vodstvom višeg kustosa Roberta Čimina, snimio: M. Vuković

**Slika 20:** Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta V. Toplice, Arheološki muzej u Zagrebu, pod vodstvom više kustosice Dore Kušan, snimio: M.Vuković

**Slika 21:** Zračna prezentacijska fotografija lokaliteta V. Toplice, Arheološki muzej u Zagrebu, pod vodstvom više kustosice Dore Kušan, snimio: M.Vuković

**Slika 22:** Zračna fotografija snimljena u svrhu arheološke prospekcije, Gradski muzej Varaždin, više kustosice Marine Šimek, snimio: M.Vuković

**Slika 23:** Skica izrađena iz zračne fotografije; linijama je naznačena pozicija opkopa, a iscrtkanom linijom su naznačeni ostaci arhitekture, izradio M.Vuković

**Slika 24:** Rimska cesta pod morem u Medulinskom zaljevu, kraj poluotoka Vižula, Hrvatski restauratorski zavod, pod vodstvom višeg konzervatora Igora Miholjeka, snimio: M.Vuković

**Slika 25:** Fotografija usnimljena u svrhu utvrđivanja točne pozicije antičke ceste, Vižula kraj Medulina, pod vodstvom višeg konzervatora Igora Miholjeka, Hrvatski restauratorski zavod, snimio: M.Vuković

**Slika 26:** Avionska snimka poluotoka Vižula (preuzeta s: [www.arkod.hr](http://www.arkod.hr) – 30.01.2014)

**Slika 27:** Fotografirano za potrebe izrade nacrtu u AutoCAD-u, Gardun - Tilurij, FFZG, Odsjek za arheologiju; voditelj: prof. dr. Mirjana Sanader, snimio: M.Vuković

**Slika 25:** Nacrt lokaliteta u AutoCAD-u izrađen pomoću zračne fotografije, izradila: dr.sc. Ina Miloglav



***Slika 26:** zračna fotografija gomile G3, Mravinjica, Dubrovački muzeji, pod vodstvom Domagoja Perkića, snimio: M.Vuković*

***Slika 27:** Nacrt gomile G3, Mravinjica, nacrt u AutoCAD-u izradio: M.Vuković*

***Slika 28:** Na lijevoj strani se nalazi slika 3D modela tumula, a na desnoj strani zračna fotografija s nalazišta; Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković*

***Slika 29:** Bočni pogled na tumul, slika 3D modela, Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković*

***Slika 30:** Pogled sa površine, slika 3D modela, Centar za prapovijesna istraživanja, voditelj: prof. Hrvoje Potrebica, snimio i izradio: M.Vuković*